第40卷 第9期
2023年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 9
Sep. 2023

宁夏水土保持生态补偿优先区识别

申 草[1]， 任宗萍[1]， 李 鹏[1]， 王凯博[2]， 鲁克新[1]， 任正龑[3]， 魏小燕[3]

（1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室，陕西 西安 710054；2. 中国科学院地球环境研究所，陕西 西安 710061；3. 宁夏回族自治区水土保持检测总站，宁夏 银川 750000）

摘 要：水土保持服务功能下的生态补偿优先区识别的研究，对建立适宜当地生态发展的水土保持生态补偿体系具有重要参考意义。以宁夏为研究区，运用InVEST模型评估水源涵养、土壤保持和碳储存三项主要水土保持服务功能，并进行价值化表达；综合考虑各区县生态补偿优先级和生态脆弱性指数，对全区水土保持生态补偿优先区进行空间识别。研究表明：2000年、2010年、2020年宁夏水土保持价值分别为2478.9×10^8元、2661.7×10^8元、2958.5×10^8元，总体呈现不断增长趋势；在空间上呈现南高北低的空间分布特征，其最高值位于泾源县，最低值位于金凤区；全区20 a来水土保持优先补偿区动态变化差异较小，补偿优先区主要位于生态价值高、经济落后的南部地区，而生态补偿次级优先区则位于中部和北部生态价值较低、经济水平较高区域。对生态补偿优先区进行补偿能够有效提高生态补偿的效率，促进区域生态环境和经济社会可持续发展。

关键词：生态服务价值；生态补偿优先区；水土保持；InVEST模型

伴随着世界经济的快速发展，生态系统面临栖息地威胁、资源短缺和生态系统服务退化等处境，自然资源、生态环境和可持续发展之间的矛盾日益突出[1-2]。经济发展与生态保护相结合逐渐成为当今世界关注的热点问题。《国家十四五规划和2035年远景目标纲要》明确提出，健全生态保护补偿机制，加大重点生态功能区生态补偿力度的要求。目前，关于生态补偿机制的研究已成为最新要旨，并成为优化空间格局、鼓励生态系统服务供给的有效措施。同时水土保持生态补偿作为维持和巩固生态效益的重要举措，有利于保护和改善生态系统的水源涵养、土壤肥力、固碳释氧等生态功能[3]。水土保持服务价值的估算既是实现水土保持生态补偿的前提，也是制定生态补偿配额的基础，对确定生态补偿分区和探索生态补偿模式及其运行机制具有重要的参考价值[4-6]。

近年来围绕水土保持生态补偿理论与实践，专家和学者重点研究了水土保持生态服务价值、生态补偿标准、生态补偿机制等。Sun等[7]运用成本-收益分析的方法评估二龙山水库流域水土保持功能价值，并根据补偿效益分配水土保持生态补偿额度；Xiong等[8]以估算的生态服务价值作为补偿标准对洞庭湖湿地恢复生态补偿标准进行分析，利用生态服务价值当量作为区域生态系统的平均表征；郭年冬等[9]应用生态补偿优先级模型，对环京津地区73个县（市）的单位面积生态系统服务价值和生态补偿优先级进行了计算，从而分析了环京津地区生态补偿的优先领域；严有龙等[10]选择农民人均纯收入对生态补偿优先级进行修正，并引入生态补偿阈值模型探索其补偿标准的合理范围，但存在评估模型的参数敏感性分析和补偿阈值跨度研究不足等问题。通过多角度对生态补偿标准及机制进行探索研究，为协调区域经济发展水平和水土保持生态系统服务功能提供理论基础。目前国内现有研究多集中在流域尺度及生态系统服务热点区域，针对西北干旱半干旱地区生态补偿机制研究匮乏[11-12]。因此，如何开展西北干旱半干旱区的水土保持生态补偿优先区识别对于科学确定生态补偿区域，最大化生态补偿收益具有重要意义。

本研究立足西北宁夏黄河流域生态保护与高

收稿日期：2023-04-03； **修订日期**：2023-06-05
基金项目：国家自然科学基金项目(42077074)；宁夏流域水土保持生态—经济协同治理技术与发展模式研究(GZ4-21-05-069/-ZC-F)
作者简介：申草（1997-），女，硕士研究生，主要研究方向为水土保持与荒漠化防治. E-mail: 1342152765@qq.com
通讯作者：任宗萍. E-mail: renzongping@163.com

质量发展先行区，在宁夏水土保持服务功能指标中选取水源涵养、土壤保持和碳储存三项指标进行功能量化和价值量化表达，并在此基础上结合生态补偿优先级概念和生态脆弱性指数计算，识别宁夏水土保持生态补偿优先区，为指导区域生态补偿实践提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

宁夏位于中国西北部地区，地理位置位于35°14′~39°23′N、104°17′~107°39′E，东邻陕西省，西部、北部接内蒙古，南部与甘肃省相连，总面积为 6.64×10^4 km^2，下辖5个地级市，22个区县。全区海拔950~3546 m，地势从西南向东北逐渐倾斜；自北向南，气候由半干旱向半湿润过渡，年均降水量由180 mm上升为650 mm左右。黄河自中卫市入境，向东北斜贯于平原之上，顺地势经石嘴山市出境[13]。按照地理因素进行划分，可将宁夏全区划分为宁夏北部黄河流域高质量发展区和宁夏南部水土保持功能区（图1）。黄河流域高质量发展区农业资源较为丰富，浇灌绿洲为主，气候干燥；南部水土保持功能区，雨水资源相对丰富，植被类型以森林和草原为主[14]。

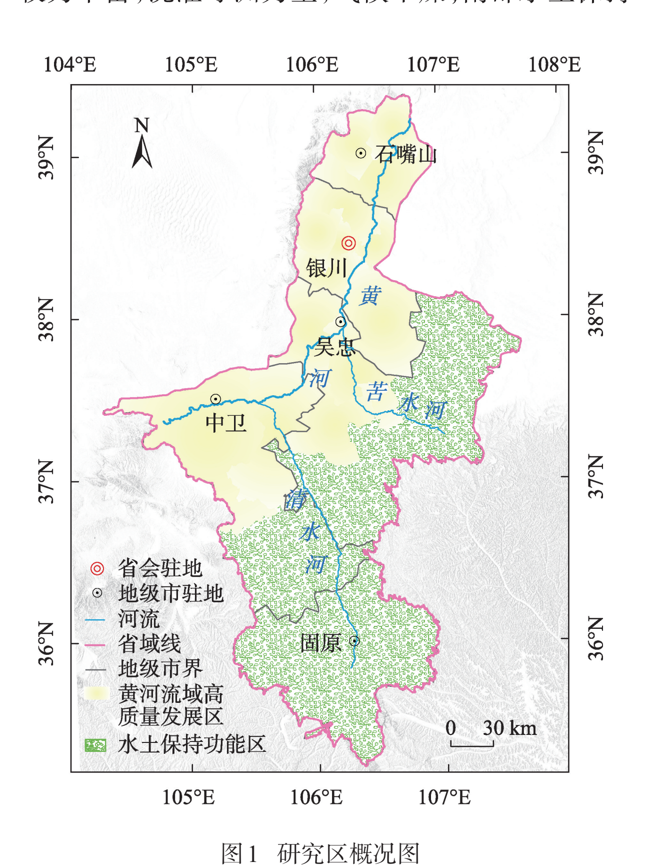


图1 研究区概况图

Fig. 1 Geographical overview map of Ningxia

1.2 研究方法和数据来源

1.2.1 水土保持服务价值核算 本文考虑到国家碳中和战略目标的重大需求以及水土保持措施的巨大固碳潜力，在研究中估算水土保持服务价值量时增加了水土保持固碳量的计算，即：

$$V_{总} = V_{水} + V_{土} + V_{碳} \tag{1}$$

式中：$V_{总}$、$V_{水}$、$V_{土}$和$V_{碳}$分别代表水土保持总价值、水源涵养价值、土壤保持价值和碳储存价值，单位均为元。

InVEST（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs）模型由斯坦福大学联合其他机构共同开发的生态系统服务和权衡的综合评估模型，能很好地量化及评估区域生态系统服务功能变化状况[15]。本文在参考生态环境部编制的《陆地生态系统生产总值（GEP）核算技术指南》[16]的基础上采用该模型评估宁夏全区水土保持服务功能量，并将水土保持服务功能量换算为价值量。各模块具体计算方法如下：

1.2.1.1 水源涵养

（1）水源涵养量计算（Water Conservation）

在结合水量平衡原理计算区域产水量的基础上，计算研究区的水源涵养量，公式如下：

$$Retention = \min\left(1, \frac{249}{Velocity}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{sat}}{300}\right) \times Yield \tag{2}$$

式中：*Retention* 为水源涵养量（mm）；*Velocity* 为流速系数，根据土地利用类型取经验值[17]；TI为无量纲的地形指数[18]；K_{sat}为土壤饱和导水率（$cm\cdot d^{-1}$），基于土壤质地数据，利用NeuroTheta软件计算得出；*Yield* 为年产水量。

（2）水源涵养价值计算

由于水源涵养价值具有外溢性，难以自发形成排他收益，其价值可通过利用水利工程调节的水源价格来计算[19]，其价格参考《林业生态工程生态效益评价技术规程》（DB11/T 1099—2014），如下式：

$$V_{水} = Retention \times C \tag{3}$$

式中：$V_{水}$为水源涵养价值（$元\cdot a^{-1}$）；*Retention* 为水源涵养量（$m^3\cdot a^{-1}$）；*C* 为建设水库的单位库容的工程成

本，按照宁夏多年居民消费指数（PPI）数据，核算2020年工程成本价为8.78元·m^{-3}。

1.2.1.2 土壤保持

（1）土壤保持量计算（Soil Conservation）

用于计算每一地块保持土壤肥力、减轻泥沙淤积和减少土地废弃的能力。模型基于通用土壤流失方程，量化了区域侵蚀量和土壤保持量。

$$Q = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (4)$$

式中：Q为土壤保持量；R为降雨侵蚀因子（MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}）；采用章文波等[20]提出的降雨量侵蚀力模型进行计算；K是土壤可蚀性因子（t·h·MJ^{-1}·mm^{-1}）数据来源为时空三极环境大数据平台（http://poles.tpdc.ac.cn）[21-22]；LS因子由Desment和Govers[23]的二维地表计算方法得出；C是作物经营因子，P为水土保持措施因子[24]。

（2）土壤保持价值计算

采用市场价值法、机会成本法和影子工程法，根据每水文响应单元（HRU）的土壤保持量定量评估土壤保持服务价值，揭示研究区生态效益。计算公式如下：

$$E_1 = Q \times B_i \times C_i \times D_i \quad (5)$$

$$E_2 = Q \times \frac{D_1}{p \times h} \quad (6)$$

$$E_3 = 0.24 \times Q \times \frac{D_2}{p} \quad (7)$$

$$V_{土} = E_1 + E_2 + E_3 \quad (8)$$

式中：$V_{土}$为土壤保持总价值（元），E_1为保持土壤肥力价值（元）；E_2为减少土地废弃价值（元）；E_3减轻泥沙淤积价值（元）；B_i表示为土壤中氮、磷、钾元素平均含量，分别取0.17%、0.06%、1.40%；C_i为土壤中的氮、磷、钾折算成相应肥料（尿素、过磷酸钙和氯化钾）的系数，取2.164、4.065、1.923[25]；D_i表示化肥的市场价格，价格来源于全国市场网（https://www.fert.cn），平均每吨售价分别为1838元、587元、2175元[26]；D_1为单位面积土地的机会成本，取值为2.35×10^5元；p为单位土壤体积质量分数，为1.25 g·cm^{-3}；h为土壤厚度，土壤数据中获取；0.24为土壤流失泥沙淤积在河道中的系数；D_2为建设水库工程的费用。

1.2.1.3 碳储存

（1）碳储存量计算（Carbon Storage）

碳储存量由地上生物量、地下生物量、死亡有机碳和土壤碳4部分组成，本研究基于各土地利用类型及其对应4种碳库中的储存量来估算研究区总碳储量[27-28]。同时以2020年为现状年，将研究区水土保持率纳入衡量水土保持背景下碳储存量的计算中[29]。计算公式如下：

$$CS = (C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil}) \times P \quad (9)$$

式中：CS为区域总碳储量（t·hm^{-2}）；C_{above}为地上部分碳储量（t·hm^{-2}）；C_{below}为地下部分碳储量（t·hm^{-2}）；C_{dead}为死亡有机碳储量（t·hm^{-2}）；C_{soil}为土壤中碳储量（t·hm^{-2}）；P为2020年研究区水土保持率。

（2）碳储量价值计算

$$V_{碳} = CS \times \frac{S_{2020}}{0.2727} \quad (10)$$

式中：$V_{碳}$为区域总碳储价值（元）；S表示碳交易价格，采用碳排放交易中心2020年的碳交易价格（85.13元·t^{-1}）；0.2727为C与CO_2的转换系数。

1.2.2 水土保持生态补偿优先区识别方法　为精细化评估区域水土保持生态补偿区识别，本研究针对县域尺度从生态补偿优先级（$ECPS$）和生态脆弱性两个维度进行评估。首先将各区县生态补偿优先级水平根据0~30%、30%~60%和60%~100%的阈值范围将其划分为1级区、2级区、3级区；其次将各县区生态脆弱性程度依据自然裂点法进行强弱分级。最后综合生态补偿优先级和生态脆弱性，为每个区县的生态补偿迫切水平打分（表1），从而得到县域生态补偿总分，分数越高越应予以优先补偿[30]。

表1 水土保持生态补偿优先区分数判定矩阵

Tab. 1 Soil and water conservation ecological compensation priority area score determination matrix

评价分数	1级区	2级区	3级区
强脆弱性	5	4	3
弱脆弱性	4	3	2

1.2.2.1 生态补偿优先级计算　本研究引入生态补偿优先级（$ECPS$）的概念，将水土保持价值与地区生产总值进行适配来衡量当地自身补偿能力，评价各地区生态补偿的迫切程度[31]。计算公式如下：

$$E_i = V_i / q_i \quad (11)$$

式中：E_i为第i个研究区的水土保持生态补偿优先级；V_i为第i个研究区的单位面积水土保持服务价值（元·km^{-2}）；q_i为第i个研究区的单位面积生产总值（元·km^{-2}）。其中，E_i越大，说明该区域GDP并不足以支持当地水土保持资源充分发挥其价值，获得生态补偿资金的迫切程度高；反之，迫切程度较低。

1.2.2.2 生态脆弱性指数计算 运用SPR模型从生态压力度—敏感度—恢复力3个目标层级选取13个评价指标来计算研究区生态脆弱程度[32-33](表2)。人口密度、GDP反映人为活动的影响;高程、坡度、地形起伏度反映地形状况;植被覆盖率和土壤侵蚀强度分别表征地表因子和土壤因子;景观多样性、土壤有机质含量和生物丰度可反映当地生态恢复状况。最终结果用于描述区域内的生态脆弱情况。计算公式如下:

$$EVI = \sum_{i=1}^{n} P_i W_i \tag{12}$$

式中:EVI为生态脆弱性指数;P_i为各评价指标得分;W_i为评价指标权重;n为指标总个数。

1.3 数据来源

采用的土地利用数据(30 m)来源于中国科学院资源环境数据中心(https://www.resdc.cn/);气象数据(30 m)来源于中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn/);土壤数据(1 km)来源于《世界土壤数据库》HWSDv1.2(https://www.fao.org/);DEM数据(30 m),来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/);植被覆盖数据(1 km)来源于国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/);社会、经济等数据来源于宁夏回族自治区统计年鉴(https://www.nx.gov.cn/)。

2 结果与分析

2.1 水土保持服务价值评估

2000年、2010年、2020年宁夏全区水源涵养总量分别为18.63×10^8^ m³、23.6×10^8^ m³、27.6×10^8^ m³,土壤保持总量分别为20.9×10^8^ t、23.1×10^8^ t、29.0×10^8^ t,碳储存总量分别为2.93×10^8^ t、2.89×10^8^ t、2.5×10^8^ t。研究区水源涵养量、土壤保持量在空间分布上具有相似性,总体呈现出“南高北低”的格局(图2),而碳储量高值区分布在沿黄区域和宁夏南部丘陵区。其中现状年份宁夏南部水土保持功能区的水源涵养总量、土壤保持总量以及碳储存总量分别为21.1×10^8^ t、24×10^8^ t、1.3×10^8^ t;而宁夏北部黄河流域高质量发展区的各类水土保持服务总量仅为6.5×10^8^ t、5.0×10^8^ t、0.96×10^8^ t,南北地区差异较大。

2000年、2010年、2020年宁夏水土保持服务总价值分别为2478.9×10^8^元、2661.7×10^8^元、2958.5×10^8^元,呈总体增长趋势。其中,水源涵养价值量分别为163.6×10^8^元、214.4×10^8^元、242.5×10^8^元,土壤保持价值量分别为1401.2×10^8^元、1539×10^8^元、1931.4×10^8^元,碳储存价值量分别为914.1×10^8^元、908.4×10^8^元、784.56×10^8^元。空间分布表现为由北向南逐步递增,高值区主要分布在同心县以南区域,中值区为宁夏北部地区以及中部的红寺堡区和盐池县,其余地区均为水土保持服务低值区。

2.2 水土保持生态补偿优先级

2000—2020年研究区各区县动态生态补偿优先级无较大波动(图3),其中,多年生态补偿迫切程度最高的均为泾源县(表3),现状年份单位面积价值最高,为2480.6×10^4^元·km^{-2},而生产总值仅为183.8×10^4^元·km^{-2},该地区经济发展水平与生态系统

表2 生态脆弱性指标选定

Tab. 2 Ecological vulnerability indicator selection

分目标层	本层权重	准则层	本层权重	指标层	指标说明
生态压力度	0.14	人口活动压力	0.4	人口密度	正向指标
		经济活动压力	0.6	地均GDP	负向指标
生态敏感性	0.62	地形因子	0.2	高程	正向指标
				坡度	正向指标
				地形起伏度	正向指标
		气象因子	0.1	降雨侵蚀力	正向指标
				年均气温	负向指标
				年均相对湿度	负向指标
		地表因子	0.1	植被覆盖率	负向指标
		土壤因子	0.5	土壤侵蚀强度	正向指标
生态恢复力	0.24	景观结构	0.2	景观多样性指数	负向指标
		功能	0.5	土壤有机质	正向指标
		生态环境质量	0.3	生物丰度	负向指标

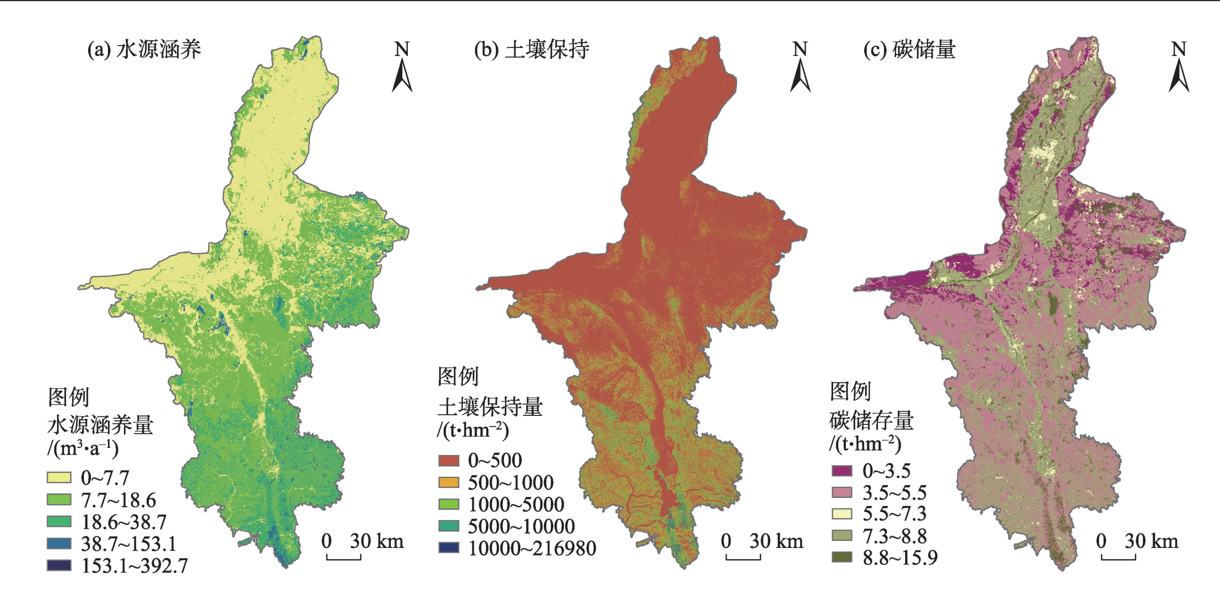


图2　宁夏全区各水土保持服务空间分布

Fig. 2　Distribution of Carbon storage, soil retention and water conservation in Ningxia

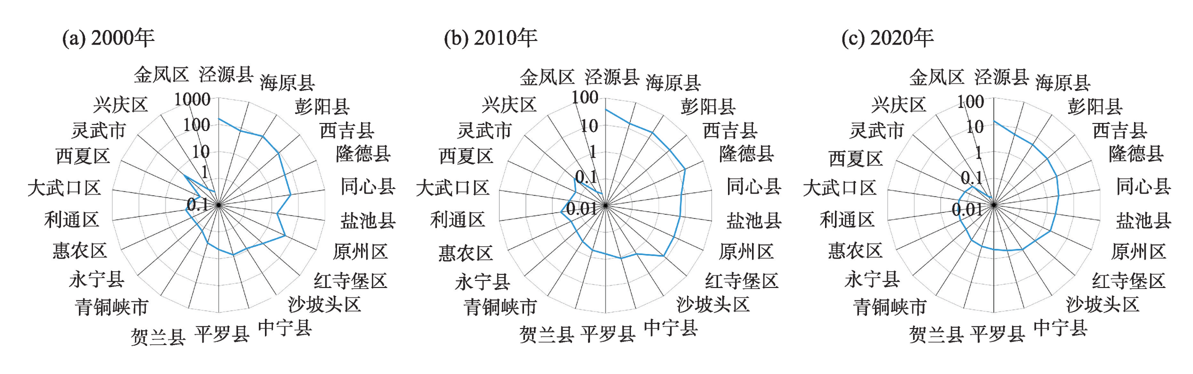


图3　2000—2020宁夏水土保持生态补偿优先级系数折线图

Fig. 3　2000−2020 line chart diagram of priority coefficient of ecological compensation for water and soil conservation in Ningxia Hui Autonomous Region

服务价值呈负相关;金凤区生态补偿优先级最低,该区生产总值高达10489.3×10^4元·km^{-2},而水土保持服务价值仅为209.3×10^4元·km^{-2},获取生态补偿迫切程度低。

根据生态补偿迫切程度进行优先级分区(图4),其中,1级区主要分布在宁夏南部丘陵区,水土保持服务价值高,经济发展水平落后,急需获得生态补偿;3级区主要分布在中北部地区,土壤保持服务价值低,经济发展水平高,获取生态补偿资金迫切程度低;2级区分布于1级区和3级区之间,土壤保持服务价值和经济发展均处于中等水平,获取生态补偿的迫切程度居中。

2.3　水土保持生态补偿优先区识别

2.3.1　生态脆弱性评价　研究区生态脆弱性呈现南强北弱的趋势,脆弱性强(*EVI*>0.45)的区域主要分布在宁夏南部隆德县、西吉县、泾源县等区县;脆弱性较低(*EVI*≤0.45)的地区主要分布在宁夏中部和北部地区,如金凤区、红寺堡区等(图5)。隆德县生态脆弱性指数均值最高,为0.54;生态脆弱性均值低值区为金凤区,脆弱指数为0.35。总的来说,宁夏南部地区存在气温低、坡度大、水土流失风险大、降雨侵蚀力大且经济发展程度低等问题,从而导致该区域潜在生态环境脆弱性问题突出。

2.3.2　水土保持生态补偿优先区划分　参考生态补偿分区标准,依据生态补偿优先区分数判断矩阵,将宁夏水土保持生态补偿区域划分为4种类型:优先补偿区、次级补偿区、一般补偿区和潜在补偿区(图6)。优先补偿区为生态补偿优先级高、生态脆弱性风险高的区域;次级补偿区为生态补偿优先级居中、生态脆弱性风险高的区域;一般补偿区为生

表3 2000—2020年宁夏各区县单位水土保持价值与GDP对比

Tab. 3 Comparison of soil and water conservation value and GDP in various districts and counties in Ningxia, 2000−2020

地区	2000年		2010年		2020年	
	水保价值/(10^4元·km^{-2})	GDP/(10^4元·km^{-2})	水保价值/(10^4元·km^{-2})	GDP/(10^4元·km^{-2})	水保价值/(10^4元·km^{-2})	GDP/(10^4元·km^{-2})
泾源县	2293.5	13.9	2452.9	64.5	2480.6	183.8
海原县	635.6	8.4	665.6	43.8	842.5	152.6
彭阳县	1133.5	10.2	1253.8	73.7	1194.0	253.3
西吉县	1081.4	12.2	1200.9	82.8	963.4	223.3
隆德县	1888.3	36.9	2021.2	110.8	1190.4	315.9
同心县	402.7	7.8	424.1	60.2	573.8	207.7
盐池县	229.2	14.6	265.7	41.8	336.5	161.3
原州区	957.0	17.9	1017.1	161.3	1019.4	495.8
红寺堡区	251.8	16.6	255.3	34.9	325.6	301.6
沙坡头区	211.8	25.6	218.6	159.6	324.7	354.5
中宁县	231.3	27.3	229.8	205.5	301.8	523.2
平罗县	218.6	48.8	245.3	393.4	367.7	812.1
贺兰县	171.7	124.0	172.3	449.9	459.3	1158.7
青铜峡市	243.2	83.0	261.1	486.1	232.9	663.0
永宁县	177.2	149.6	181.7	666.2	255.7	1093.2
惠农区	194.2	111.4	189.5	390.9	343.8	1473.2
利通区	197.6	153.2	245.0	955.0	235.1	1055.7
大武口区	258.2	247.8	287.2	1278.7	406.0	1968.7
西夏区	174.8	34.8	181.9	531.6	550.5	3590.9
灵武市	258.0	449.4	272.9	1638.6	201.1	1748.6
兴庆区	150.1	307.8	154.2	3805.1	199.3	8244.0
金凤区	160.2	484.3	138.7	4759.2	209.3	10489.3

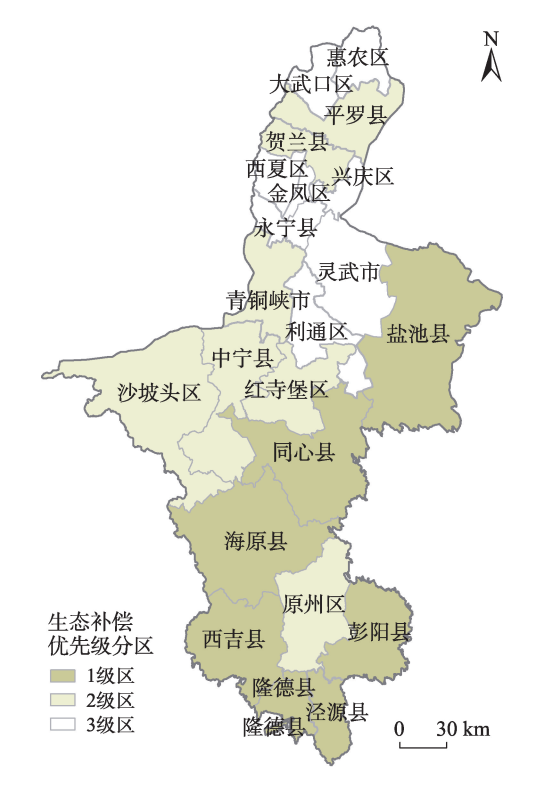


图4 宁夏各县市水土保持生态补偿优先级分区

Fig. 4 Ecological priority zoning of Ningxia counties and cities

态补偿优先级居中、生态脆弱性风险低或生态补偿优先级低、生态脆弱性风险高的区域；潜在补偿区为生态补偿优先级低、生态脆弱性风险低的区域。

2.4 水土保持生态补偿优先区特征分析

宁夏水土保持生态补偿优先区覆盖全区土地面积的46%，水土保持总价值高达1892.2×10^8元，占比为63.95%，而经济生产总值仅占12%（表4）。优先补偿区主要分布在宁夏南部地区，其地势起伏大，宁南山区水土流失面积达25800 km^2，占区域总面积的71%。如果不做人为干预，水土在自然移动过程中可能会随时间对其他区域产生持续的、不可逆的影响。因此，该区域不仅应着眼于保有本区较高的水土保持服务价值及可能提升的生产性价值，还应具有维系或提高整个宁夏水土保持功能的作用。在资金有限的情况下，这些县区应优先给予更多资金补助。

宁夏次级补偿区分布在沙坡头区和原州区，总面积为8132 km^2，水土保持价值合计为455.5×10^8元，占比为15.39%；受地势影响，该区水土流失同样较为严重，占全区水土流失面积的15%。其经济发

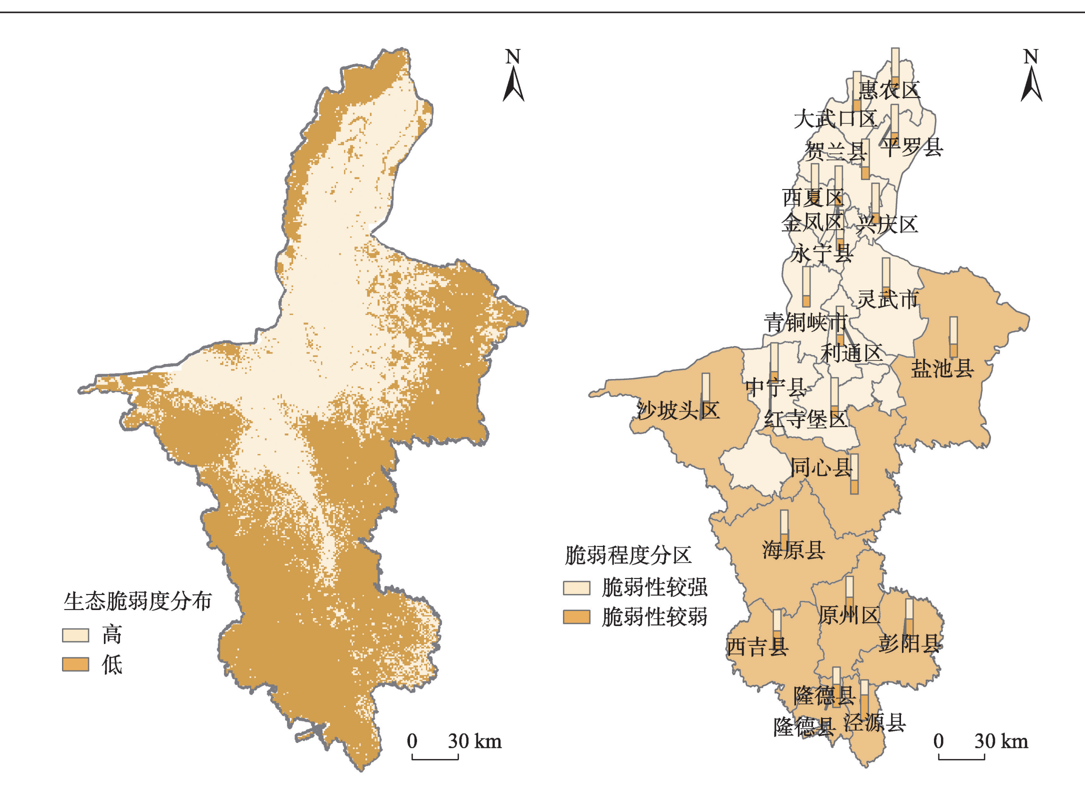


图5　宁夏生态脆弱性分布及指数排序

Fig. 5　Distribution of ecological vulnerability and index ranking of Ningxia

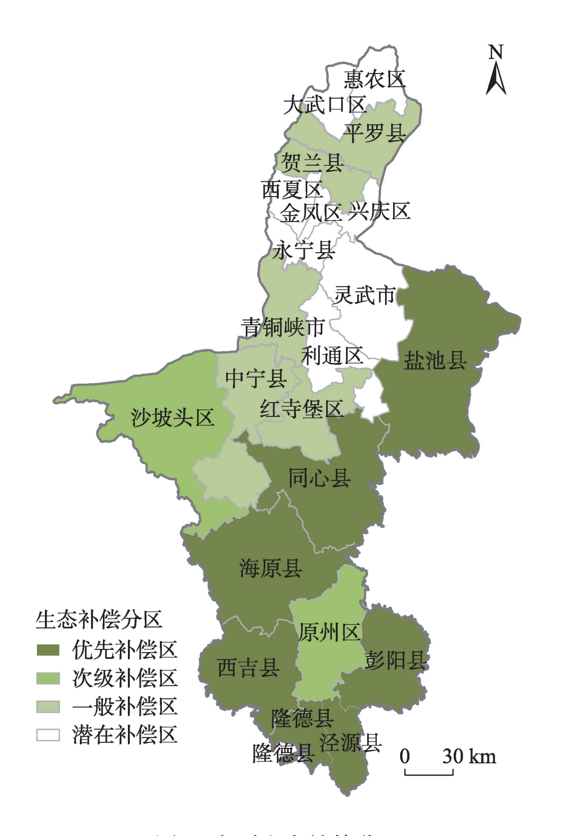


图6　宁夏生态补偿分区

Fig. 6　Ecological compensation zoning in Ningxia

展处于中等水平,具有很大的发展潜力,水土流失不应成为制约其经济发展的因素,在保证优先补偿区得到必要补偿后,对次级补偿区也应给予一定的补偿。

一般补偿区和潜在补偿区主要分布在宁夏的中北部地区,土地面积占全区的38%。由于工业化和城市化水平高,水土保持价值较低,仅为610.8×10^8元,合计占比为20.6%,但其经济发展贡献率高,生产总值占全区的79%。一般补偿区和潜在补偿区都属于低效补偿区,在资金十分充足条件下才考虑对上述区域进行补偿。

3　讨 论

水土保持服务价值的定量化评估是衡量生态环境质量的前提,更是生态补偿的基础。其价值的高低很大程度上依托于区域自然条件及生态系统的内在功能。就宁夏地区而言,南部属于山区、丘陵地形,林草地分布广泛,植被盖度高,从而具有较高的水土保持价值;而北部和中部为平原地带,黄河流经,多为建设用地以及耕地,植被盖度低,导致水土保持价值低。因此,着眼于生态系统具备的天然属性,水土保持价值核算是为进行生态补偿区域识别的重要基础。同时,本文分析了2000年、2010

表4 宁夏水土保持生态补偿区划特征

Tab. 4 Characteristics of soil and water conservation ecological compensation zoning in Ningxia

生态补偿区划	补偿面积/(km²)	补偿面积占比/%	水土保持价值/10⁸元	水土保持价值占比/%	GDP占比/%	水土流失面积占比/%
优先补偿区	23726	0.46	1892.2	0.64	0.12	0.71
次级补偿区	8132	0.16	455.5	0.15	0.09	0.15
一般补偿区	10533	0.2	342.2	0.12	0.18	0.08
潜在补偿区	9532	0.18	268.6	0.09	0.61	0.07

年、2020年宁夏地区基于水土保持价值和经济发展的动态生态补偿优先级指数,20 a间优先指数走势基本变化不大,1级区和2级区经济发展受到自然资源以及地理环境的影响较大,生态保护限制了一定的社会发展机会;3级区更注重发展经济从而对生态供给量较少,依据受益补偿原则,适当反哺经济发展滞后区域有助于实现生态价值—经济价值高质量转变。

生态补偿优先区识别的初衷是为了合理生态补偿资金配置,将有限的资金尽可能地补给到水土保持价值高却经济落后的地区。同时自然地理条件对生态系统服务和社会发展有着重要影响,因此为提高补偿的准确度,最大化补偿效益,本文将生态脆弱性纳入考量范畴,综合考虑自然—经济—水土保持服务价值三者耦合下的生态补偿优先区识别。其中,优先补偿区域土地利用类型基本以林地为主,提供的水土保持功能更强,其产生的水土保持价值高,为全省的水土保持安全工作做出了巨大贡献。但其因承担着全省水土保持生态功能的保障工作,不得不损失一些社会经济发展的机会,加之其本身人口活动较少、条件差,导致区域内经济发展较慢,经济水平较低,当地水土保持生态价值与经济发展矛盾突出,迫切需要生态补偿资金支持。本研究所使用的水土保持生态补偿优先级方法能有效识别出最紧迫的受偿区域,同时,考虑将经济能力过剩区县资金反哺亟待补偿区县,使水土保持价值高但生态受损的区县发挥除其潜在生态价值,确保生态资源与经济资源的动态平衡。

4 结 论

(1) 2000年、2010年、2020年宁夏水土保持服务总价值分别为2478.9×10⁸元、2661.7×10⁸元、2958.5×10⁸元,呈总体增长趋势,其空间分布表现为从北部向南逐步递增。宁夏各县区价值量差异明显,最高的泾源县单位价值量达2480×10⁴元·km⁻²,约为价值最低的兴庆区的12倍。这种差异主要受制于生态系统的自然属性、地理环境以及气候等,水土保持服务价值是生态补偿优先区识别的首要考虑因素。

(2) 依据生态补偿优先级分级法,将宁夏各县区划分为3种补偿优先等级区。1级区主要分布在水土保持服务价值高,经济发展水平落后的宁夏南部地区,急需获得生态补偿;3级区主要分布在水土保持服务价值低,经济发展水平高的宁夏中部和北部地区,获取生态补偿资金迫切度低;2级区介于1级区和3级区之间分布,水土保持服务价值和经济发展均处于中等水平,获取生态补偿的迫切度居中。

(3) 宁夏水土保持生态补偿优先区和次优先区主要分布在南部和中部地区,分别占全区土地面积的46%和16%。优先补偿区和次级补偿区的水土保持价值贡献率高且生态脆弱性风险高,但由于经济发展落后导致其潜在生态价值难以发挥,应优先给予更多资金补助;一般和潜在补偿区均属低效补偿区,对其进行补偿可能会产生补偿过剩,应对该地区生态问题多加以关注。

参考文献(References):

[1] Lu Y, Zhang L, Feng X, et al. Recent ecological transitions in China: greening, browning and influential factors[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8732.

[2] De Groot R, Brande L, Ploeg S, et al. Global estimates of the value of ecosystem and their services in monetary units[J]. Ecosystem Services, 2012, 1(1): 50-61.

[3] Farley J, Costanza R. Payments for ecosystem services: From local to global[J]. Ecological Economics, 2010, 69(11): 2060-2068.

[4] Costanza R, De Groot R, Farber S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387 (6630): 253-260.

[5] 赵建林, 董志洋, 常兆丰. 基于生态服务价值机会成本的沙漠电灌工程生态补偿研究——以景电高扬程电力提灌工程为例

[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 743−751. [Zhao Jianlin, Dong Zhiyang, Chang Zhaofeng. Ecological compensation of a desert water-lifting irrigation project based on opportunity cost of ecosystem service value: A case study on Jingtaichuan Water-Lifting Irrigation Project[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 743−751.]

[6] Wang C D, Li W Q, Sun M X, et al. Exploring the formulation of ecological management policies by quantifying interregional primary ecosystem service flows in Yangtze River Delta region, China [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 284: 112042.

[7] Sun L N, Lu W X, Yang Q C, et al. Ecological compensation estimation of soil and water conservation based on cost-benefit analysis[J]. Water Resources Management, 2013, 27(8): 2709−2727.

[8] Xiong Y, Wang K L. Eco-compensation effects of the wetland recovery in Dongting Lake area[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(3): 389−405.

[9] 郭年冬, 李恒哲, 李超, 等.基于生态系统服务价值的环京津地区生态补偿研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1473−1480. [Guo Niandong, Li Hengzhe, Li Chao, et al. Regional ecological compensation based on ecosystem service value in the area surrounding Beijing and Tianjin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(11): 1473−1480.]

[10] 严有龙, 王军, 王金满. 基于生态系统服务的闽江流域生态补偿阈值研究[J]. 中国土地科学, 2021, 35(3): 97−106. [Yan Youlong, Wang Jun, Wang Jinman. Study on eco-compensation thresholds of Min River basin based on ecosystem services[J]. China Land Science, 2021, 35(3): 97−106.]

[11] 高振斌, 王小莉, 苏婧, 等. 基于生态系统服务价值评估的东江流域生态补偿研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(6): 563−570. [Gao Zhenbin, Wang Xiaoli, Su Jing, et al. Ecological compensation of Dongjiang River basin based on evaluation of ecosystem service value[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(6): 563−570.]

[12] 胡影, 冯晓明, 巩杰. 基于生态系统服务的宁夏回族自治区自然-社会经济协调性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6523−6533. [Hu Ying, Feng Xiaoming, Gong Jie. Coordination analysis of the nature and social-economic system of Ningxia Hui Autonomous Region based on ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6523−6533.]

[13] 魏东, 杨阳, 倪细炉. 区域森林生态系统服务功能评估——以宁夏回族自治区为例[J]. 西北林学院学报, 2018, 35(3): 278−284. [Wei Dong, Yang Yang, Ni Xilu, et al. Regional forest ecosystem services assessment: A case study of Ningxia Hui Autonomous[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 35(3): 278−284.]

[14] 黄悦悦, 杨东, 冯磊. 近年来宁夏植被指数与气候生产力的时空变化[J]. 水力发电学报, 2019, 38(11): 70−81. [Huang Yueyue, Yang Dong, Feng Lei. Spatiotemporal distributions of vegetation index and climatic productivity in Ningxia in recent years[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(11): 70−81.]

[15] Sharp R, Chaplin-Kramer R, Wood S, et al. InVEST 3.9.0 User's Guide[EB/OL]. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2020.

[16] 生态环境部环境规划院, 中国科学院生态环境研究中心. 陆地生态系统生产总值核算技术指南(20201654−T−469)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. [Chinese Academy of Environmental Planning, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS. Gross Terrestrial Ecosystem Product Accounting Technical Guidelines (20201654- T- 469) [S]. Beijing: China Standards Press, 2020.]

[17] Richard G Allen, Luis S Pereira, Dirk Raes. Crop Evapotranspiration-guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. Rome: FAO-Food and Agriculture Organizationof the United Nations, 1998.

[18] 贾雨凡, 王国庆. 基于InVEST模型的伊洛河流域水源涵养能力评估[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 101−108. [Jia Yufan, Wang Guoqing. Assessment of water conservation capacity of Yiluo River basin based on the InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 101−108.]

[19] 田义超, 白晓永, 黄远林, 等.基于生态系统服务价值的赤水河流域生态补偿标准核算[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 312−322. [Tian Yichao, Bai Xiaoyong, Huang Yuanlin, et al. Ecological compensation standard accounting of Chishui River Basin based on ecosystem service value[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 312−322.]

[20] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 27(1): 35−41. [Zhang Wenbo, Fu Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount[J]. Resources Science, 2003, 27(1): 35−41.]

[21] 杨苗苗, 杨勤科, 张科利, 等.砾石含量对土壤可蚀性因子估算的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1157−1168. [Yang Miaomiao, Yang Qingke, Zhang Keli, et al. Effects of content of soil rock fragments on calculating of soil erodibility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5) : 1157−1168.]

[22] 杨勤科. 泛第三极(20国)土壤可蚀性因子(K)数据集(2020年, 7.5弧秒分辨率)[DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2021. [Yang Qinke. Soil Erodibility Dataset of Pan-Third Pole 20 Countries (2020, with a resolution of 7.5 arc second)[DB/OL]. National Tibetan Plateau Scientific Data Center, 2021.]

[23] Desment P J, Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(5): 427−433.

[24] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7582−7595. [Wang Bei, Zhao Jun, Hu Xiufang. Analysison trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in the Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7582−7595.]

[25] 朱青, 周自翔, 刘婷, 等. 黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究——以延河流域为例[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2557−2570. [Zhu Qing, Zhou Zixiang, Liu Ting, et al. Vegetation restoration and ecosystem soil conservation service value increment in Yanhe Watershed, Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2557−2570.]

[26] 吴娜, 宋晓谕, 康文慧, 等. 不同视角下基于InVEST模型的流域生态补偿标准核算——以渭河甘肃段为例[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2512−2522. [Wu Na, Song Xiaoyu, Kang Wenhui. Standard of payment for ecosystem services in a watershed based on InVEST model under different standpoints: A case study of the Weihe River in Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2512−2522.]

[27] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].生态学报, 2021, 41(10): 4052−4065. [Liu Yang, Zhang Jun, Zhou Dongmei, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST

model[J]. Acta Ecologica Sinice, 2021, 41(10): 4052-4065.]

[28] 薛卓彬. 基于InVEST模型的延河流域生态系统服务功能评估[D]. 西安: 西北大学, 2017. [Xue Zhuobin. The Assessment of Ecosystem Services Functions in Yanhe River Based on the InVEST Model[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.]

[29] 宁夏回族自治区水利厅. 宁夏回族自治区2020年水土保持公报[R]. 2020. [Ningxia Water Conservancy. Ningxia Hui Autonomous Region 2020 Soil and Water Conservation Bulleti[R]. 2020.]

[30] 李姣, 李朗, 汪杰, 等. 水土保持生态补偿优先区域的空间识别: 以洞庭湖生态经济区为例[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(4): 474-483. [Li Jiao, Li Lang, Wang Jie, et al. Priority areas recognition of ecological compensation for soil and water conservation: Taking Dongting Lake eco-economic zone as an example[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(4): 474-483.]

[31] 王女杰, 刘建, 吴大千, 等.基于生态系统服务价值的区域生态补偿: 以山东省为例[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6646-6653. [Wang Nüjie, Liu Jian, Wu Daqian, et al. Regional eco-compensation based on ecosystem service assessment: A case study of Shandong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6646-6653.]

[32] 金丽娟, 许泉立. 基于SRP模型的四川省生态脆弱性评价[J]. 生态科学, 2022, 41(2): 156-165. [Jin Lijuan, Xu Quanli. Ecological vulnerability assessment of Sichuan Province based on SRP model[J]. Ecological Science, 2022, 41(2): 156-165.]

[33] 李永化, 范强, 王雪, 等.基于SRP模型的自然灾害多发区生态脆弱性时空分异研究——以辽宁省朝阳县为例[J]. 地理科学, 2015, 35(11): 1452-1459. [Li Yonghua, Fan Qiang, Wang Xue, et al. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability under the frequency of natural hazard based on srp model: A case study in Chaoyang County[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(11): 1452-1459.]

Identification of priority areas for ecological compensation under soil and water conservation in Ningxia

SHEN Cao[1], REN Zongping[1], LI Peng[1], WANG Kaibo[2], LU Kexin[1],
REN Zhengyan[3], WEI Xiaoyan[3]

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 3. Soil and Water Conservation Monitoring Station, Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750000, Ningxia, China)

Abstract: Identifying priority areas for ecological compensation under soil and water conservation is an important reference for establishing a suitable compensation system to support local ecological development. In this study, the Ningxia Hui Autonomous Region is taken as the study area, and the InVEST model is employed to evaluate three major soil and water conservation service functions: water connotation, soil conservation, and carbon storage. Their respective value amounts were assessed. Additionally, the ecological compensation priority and ecological vulnerability index of each district and county are considered to conduct a spatial identification of priority areas for ecological compensation for soil and water conservation in Ningxia. Research has shown that the value of soil and water conservation in Ningxia has steadily increased each decade from 2000 to 2020, reaching 247.89 billion yuan, 266.17 billion yuan, and 295.85 billion yuan, respectively. Geographically, the southern regions generally exhibit higher values, whereas the northern regions show lower values, with Jingyuan County, Guyuan City, and Jinfeng District, Yinchuan City, representing the highest, and lowest values, respectively. Over the years, the priority compensation areas for soil and water conservation have experienced relatively minor changes. These areas are mainly located in the southern regions, characterized by high ecological value but economic backwardness. The secondary priority areas for ecological compensation are located in the central and northern regions, characterized by low ecological value but high economic development. Compensating these priority areas can effectively improve the efficiency of ecological compensation, foster the regional ecological environment, and promote sustainable economic, and social development.

Keywords: ecological service value; ecological compensation priority zone; soil and water conservation; InVEST model